

DSmT 的主冷却剂泵并发故障融合方法分析

郭 清^{1,2}, 夏 虹², 韩文伟²

(1. 哈尔滨工程大学 工程训练中心, 150001 哈尔滨;

2. 哈尔滨工程大学 核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 150001 哈尔滨)

摘 要: 针对核电站主冷却剂泵故障特征微弱难以有效辨识及 DST 仅能解决在无高冲突辨识框架下的单一故障诊断等问题, 提出一种基于 DSmT 决策级主冷却剂泵并发故障融合诊断模型. 采用核主泵自由 DSm 模型和混合 DSm 模型对含有故障信息的多个独立证据源进行动态融合计算; 分析核主泵 DSmT 故障特征信度赋值变化, 确定主冷却剂泵故障(并发故障)诊断总决策. 结果表明, 将核仿真机采集 TS、SS、VS 和 DS 多源传感器数据直接对基本概率函数进行赋值, 得出主冷却剂泵故障(并发故障)决策结果与实际工况相符, 实例验证了所提方法的可行性、有效性及准确性.

关键词: DSmT; 故障识别; 主冷却剂泵; 信息融合

中图分类号: TL99

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)09-0111-05

Concurrent fault information fusion methods of main coolant pump based on DSmT

GUO Qing^{1,2}, XIA Hong², HAN Wenwei²

(1. Engineering Training Center, Harbin Engineering University, 150001 Harbin, China; 2. National Defense Key Subject Laboratory for Nuclear Safety and Simulation Technology, Harbin Engineering University, 150001 Harbin, China)

Abstract: Aiming at the problems that the faults of NPP's main coolant pump are difficult to recognize effectively during their early phases, and that DST can only solve single fault diagnosis in the identification framework without serious conflict, this paper proposes a diagnosis model for main coolant pump's concurrent fault fusion in early phases, based on DSmT. Taking advantage of DSmT, multiple independent proofs are used to conduct fusion decision, and obtain the results of main pump fault and concurrent fault diagnosis. On the simulation machine of nuclear power plant, main coolant pump was simulated and verified, and the results show that this method can improve the accuracy of recognition of main pump's current faults during early phases, and reduce the uncertainty of the diagnosis.

Keywords: DSmT; fault identification; main coolant pump; information fusion

根据核电站运行事件综合报告统计显示发生故障率较高的设备主要集中在核反应堆中主冷却系统, 其中的主冷却剂泵(简称核主泵)是核岛中唯一高速旋转的设备, 在长期的高温、高转速的工况下其故障及并发故障占有极高的比例. 主冷却剂泵早期故障特征十分微弱, 受轴系复杂结构和信号传播介质的影响, 其微弱动态故障信号具有

较高的隐蔽性和不确定性, 极易被人忽略.

按照输入信息的抽象层次可将信息融合划分为数据层融合、特征层融合和决策层融合. 从信息融合的层次划分角度看, 文献[1]研究了数据层上使用小波分析方法从主泵主轴不对中、初始弯曲和开裂纹 3 个典型故障振动曲线中提取有效故障特征信息. 文献[2]研究了特征层上使用小波包方法, 在无动不平衡频率频带内得主泵出裂纹振动特征频率. 本文在此基础上研究决策层核主泵 DSmT 并发故障融合算法, 针对主冷却剂泵故障识别难以决策问题, 构建核主泵 DSmT 故障(并发故障)模型,

收稿日期: 2014-03-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379046).

作者简介: 郭 清(1978—), 女, 博士研究生;

夏 虹(1962—), 女, 教授, 博士生导师.

通信作者: 郭 清, guoqing@hrbeu.edu.cn.

验证核主泵并发故障 DSmT 融合算法的有效性.

1 核主泵 DSmT 故障诊断融合方法

DSmT^[3-7] (dezert-smarandache theory) 是信息融合算法中的新分支,它是 D-S 证据理论 (D-S evidence theory, DST) 的扩展.DSmT 能够组合成以信任函数表达不确定、高冲突、不精确的独立信源集合,当信源间的冲突变大或者元素模糊、相对不精确时,DSmT 能够解决复杂静态或动态融合问题.不但能实现 DST 的功能,还能很好地弥补 DST 在处理高冲突甚至相互矛盾证据时的缺陷,因此它也被称为似真和冲突推理理论 (plausible and paradoxical reasoning theory).采用 DSmT 冲突比例重分配的规则,可化简各类证据间矛盾信息,重新分配不符合实际的故障诊断证据.

1.1 核主泵并发故障 DSmT 融合分析

当前核动力装置结构越来越精细,辅助自动化程度越来越高,因而并发故障发生可能性越来越大,并发故障类型也越来越多,其中以主冷却剂泵并发故障概率最高.DST 辨识框架 Θ 由 n 个完备且排他的元素 $\theta_i (i = 1, 2, \cdots, n)$ 组成,即 $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_n\}$.辨识框架中元素 $\theta_i (i = 1, 2, \cdots, n)$ 相互排斥,即 $\theta_k \cap \theta_l = \emptyset (k \neq l; k, l = 1, 2, \cdots, n)$.当 DST 应用于核动力装置故障诊断时,令 θ_i 为核设备的故障模式,由于 θ_i 间具有排他性使得并发故障在 DST 框架下无法表示,因此 DST 故障诊断方法仅适用于单一故障诊断,并不能实现对核设备并发故障诊断要求.

DSmT 提出了描述、分析和组合有效信息的新形式,DSmT 中的辨识框架 Θ 是在 DST 基础上放宽排他性约束而建立起来的,它允许鉴别框中命题间存在矛盾因素.DSmT 辨识框架中元素没有要求必须是互斥的硬性条件,即 DSmT 中 Θ 元素不必规定 $\theta_k \cap \theta_l = \emptyset (k \neq l; k, l = 1, 2, \cdots, n)$.相对于 DST 幂集 2^Θ 概念,DSmT 扩展为超幂集 D^Θ 概念,对辨识框架 Θ 中元素进行并 ($\cup$) 和交 ($\cap$) 运算产生集合.经分析发现并发故障诊断理论框架可直接产生,用元素之间“交”表示并发故障.如果核主泵的两种故障模式分别用 θ_1 和 θ_2 表示,那么 $\theta_k \cap \theta_l$ 表示 θ_1 发生且 θ_2 也发生,用两种故障模式“ $\cap$ ”可以表示两种故障同时发生.研究主冷

却剂泵 DSmT 并发故障诊断解决方案时,首先需要建立涵盖核主泵单发和并发故障的辨识框架,在此框架中采取合适的 DSmT 组合规则对各独立证据源进行递归融合计算,得出主冷却剂泵并发故障融合决策结果.

DSmT 的一个主要缺点和目前还没有解决或者说无解的问题是,当焦元大于 10 时,会发生信息爆炸的情况.也就是说如果核动力装置故障模式种类越多,计算量越大.但在实际核动力装置运行中,故障模式不会同时超过 10 种,核设备运行时要求必须满足单一故障准则,因而在核动力设备中几乎永远不存在 10 种并发故障发生,除非是在核事件、核泄露或核事故情况下.因此本文研究的 DSmT 并发故障融合模型不存在“焦元爆炸”现象.对于核动力装置故障类型基本是可预计的,某种故障仅跟其他某个或某些故障并发,跟另一些故障一般来说永远也不会发生.也就是说针对某具体核设备而言,常发生的并发故障只有一种或几种,如主冷却剂泵常并发故障主要集中在转子不对中和转子不平衡.这样在构建 DSmT 辨识框架和定义约束条件时,就可以不考虑不可能发生或很少发生的并发故障,假设有两种故障模 θ_1 和 θ_2 ,如果 θ_1 和 θ_2 不可能发生或很少同时发生,则可令 $\theta_1 \cap \theta_2 = \emptyset$.这样 $|D^\Theta|$ 就会大大减少,计算量也能随之骤减.

1.2 核主泵并发故障 DSmT 融合过程

本文研究的核主泵 DSmT 目标判决准则与基本证据理论的决策方法相似但却有实质的不同,其相同点是都采用信度函数赋值对故障目标类别进行决策判断.并发故障 DSmT 融合模型依据经典 DSm 组合规则和混合 DSm 组合规则^[8-11]来实现核主泵故障证据源在空间域和时间域的决策融合.经典 DSm 组合规则利用递归形式表述,在时/空域能够有效地进行时间域融合,快速实现核主泵 DsmT 动态融合决策判断.

核主泵 DSmT 融合模型进行故障信息诊断时,如图 1 所示,首先在自由 DSm 模型中,对 n 个证据源 S 运用经典 DSm 组合规则给出完整性约束条件,即在自由 DSm 模型 $M^f(U)$ 中加入完整性约束条件,构建新的混合 DSm 模型 $M(U)$,然后在此模型中使用混合 DSm 组合规则,最终得出融合决策结果.

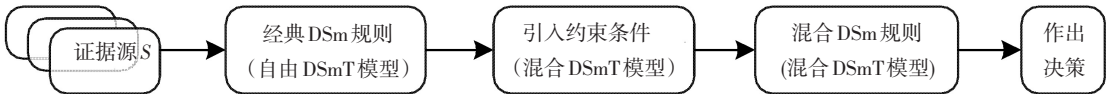


图 1 核主泵并发故障 DSmT 融合过程分解

核主泵 DSmT 融合模型计算时主要采用递归计算融合思想,对于 n 个证据源,先在自由 DSmT 模型上计算前 $n-1$ 条证据的融合结果,再经在自由 DSm 模型上得到第 n 条证据和前 $n-1$ 条证据融合结果逐次进行融合计算,最后在混合 DSm 模型上使用混合 DSmT 规则得出第 n 条证据,即最终融合决策判断结果.DSmT 组合规则不仅可以诊断出单一故障,同时还能够诊断出并发故障.

1.2.1 核主泵自由 DSm 模型融合过程

令 Θ 为一鉴别框架,如果函数 $m:2^\Theta \rightarrow [0,1]$ 满足条件: $m(\varphi)=0$; $\sum_{A \subseteq \Theta} m(A)=1$,则 $m(\cdot)$ 称为基本概率赋值(basic probability assignment, BPA, 也称为 m 函数),表明焦元的信度大小.其中: 2^Θ 为 Θ 的幂集; $\emptyset$ 为空集. $m(\cdot)$ 是核主泵所需的证据评价,也可称为故障评价.对于不确定和高冲突的证据源,自由 DSm 模型进行融合时有 $\forall A \neq \emptyset \in D^\Theta$,

$$m_{M(\Theta)}(A) \triangleq [m_1 \oplus \dots \oplus m_k](A) = \sum_{\substack{X_1, \dots, X_k \in D^\Theta \\ (X_1 \cap \dots \cap X_k) = A}} \prod_{i=1}^k m_i(X_i). \quad (1)$$

1.2.2 核主泵混合 DSm 模型融合过程

混合 DSm 模型融合过程是在考虑了核主泵所有可能的完全约束而扩展来的,混合 DSm 模型 $M(\theta)$ 是在自由 DSm 模型 $M'(\theta)$ 中,对 D^Θ 的命题 A 中引入完全约束条件,其前提条件是涵盖所有对应模型的本质和属性.在主冷却剂泵 DSmT 故障诊断中,一部分元素 $\theta_i (i=1,2,\dots,n)$ 之间是相互排斥的,即 $\theta_k \cap \theta_l = \emptyset (k \neq l; k, l=1,2,\dots,n)$,为了更好地描述核主泵并发故障特征的融合问题,符合实际工况将这些互斥约束都加到核主泵故障 DSm 模型中,相关故障证据源 $(A \in D^\Theta)$ 间组合混合 DSm 组合规则为

$$m(A) = \delta(A) [S_1(A) + S_2(A) + S_3(A)]. \quad (2)$$

其中 $S_1(A)$ 、 $S_2(A)$ 和 $S_3(A)$ 的表达式分别为

$$S_1(A) \equiv m(A) = \sum_{\substack{X_1, X_2, \dots, X_k \in D^U \\ X_1 \cap X_2 \cap \dots \cap X_k = A}} \prod_{i=1}^k m_i(X_i), \quad (3)$$

$$S_2(A) = \sum_{\substack{X_1, X_2, \dots, X_k \in \emptyset \\ [u(X_1) \cup \dots \cup u(X_k) = A] \vee [u(X_1) \cup \dots \cup u(X_2) \in \emptyset] \wedge (A = I_i)}} \prod_{i=1}^k m_i(X_i), \quad (4)$$

$$S_3(A) \equiv \sum_{\substack{X_1, X_2, \dots, X_k \in D^U \\ (X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_k) = A \\ X_1 \cap X_2 \cap \dots \cap X_k = \emptyset}} \prod_{i=1}^k m_i(X_i). \quad (5)$$

式中: $S_1(A)$ 为描述主冷却剂泵 DSmT 故障辨识框架下 k 个独立信息源基于自由 DSm 模型的经典组合公式; $S_2(A)$ 为核主泵所有相对和绝对空集的 BPA 转化为相对的或完全未知的 BPA; $S_3(A)$ 为把核主泵相对空集的 BPA 转换给非空集合的并集.

对于研究对象主冷却剂泵而言, $S_2(A)$ 和 $S_3(A)$ 在实际故障诊断中不可能发生并发故障,因此对式(4)和式(5)都进行了约束设定,即无并发故障情况都定义为 $\emptyset$,这样既简化了表达式计算量,又剔除了无用信息,此后再对余下故障所包含信息进行重新融合分配.

1.3 核主泵 DSmT 故障特征信度赋值分析

选取主冷却剂泵故障类型作为辨识框架,主冷却剂泵各种可能故障集合构成辨识框架,故障的每一症状作为一个独立证据源.若有 n 种故障,则 $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$,超幂集 D^Θ 形成了核主泵测量数据结构.采用各证据独立源的基本概率赋值 $m(A)$ 表征故障特征,它能够直观地表达出核主泵各故障的融合信度分配.令 $\Theta = \{\theta_1, \theta_2\}$,在初始基本信度赋值 $m_1(\cdot)$ 和 $m_2(\cdot)$ 中引入一个小变量 $\varepsilon > 0$,分析比较 $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} m(\cdot)$ 时, $m_1(\theta_1) = 1 - \varepsilon$, $m_1(\theta_2) = \varepsilon$ 和 $m_2(\theta_1) = \varepsilon$, $m_2(\theta_2) = 1 - \varepsilon$ 的数值融合结果.

依据混合 DSm 组合规则,能够得到核主泵在完全未知情况下预期信度赋值,对于 θ_1 、 θ_2 、 $\theta_1 \cap \theta_2$ 及 $\theta_1 \cup \theta_2$ 的信度赋值随着变量 ε 的变化,如图 2 所示,获得自由 DSm 规则和混合 DSm 规则对比的融合信度赋值估计响应变化曲线.

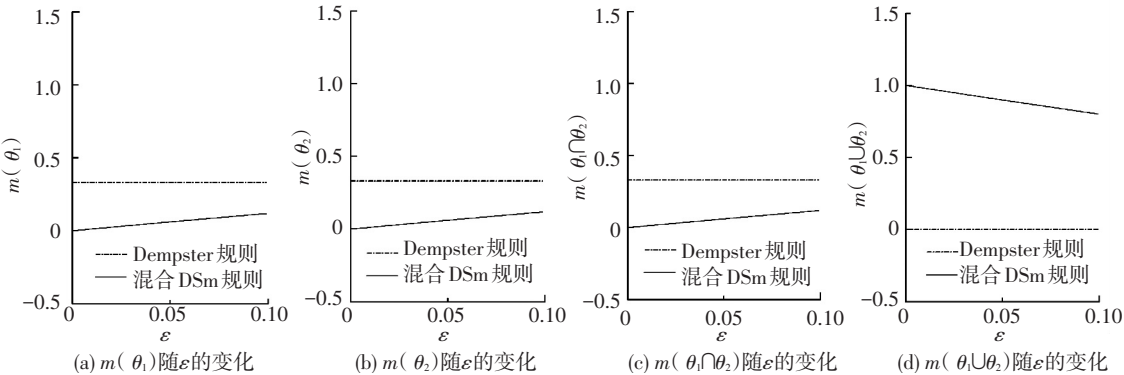


图 2 变量 ε 对 $\theta_1 \cap \theta_2$ 信度赋值的响应

$\theta_3) \cap \theta_2) = 0.07, m_{M(\theta)}((\theta_2 \cup \theta_3) \cap \theta_1) = 0.02.$

图 5 显示了核主泵自由 DSm 模型和混合 DSm 模型融合结果对比,图 5 中 $m'(\cdot)$ 表示核主泵自由 DSm 模型中的所有焦点, $m(\cdot)$ 表示核主泵混合 DSm 模型中的所有焦点.从图 5 中可以看出,核主泵直接应用 DSmT 融合最终决策结果为 $\theta_1 \cap \theta_2$, 即表示有两种故障情况并发,对应为主冷却剂泵转子不平衡和转子不对中的并发故障.验证了本文所提出的核主泵 DSmT 并发故障融合算法在处理核主泵故障证据冲突问题时,与核仿真机实验工况相符.实验结果表明,该融合方法能够有效、准确地对核主泵多重并发冲突证据进行有效处理,对核动力装置并发故障领域进行了有益的探讨和研究.

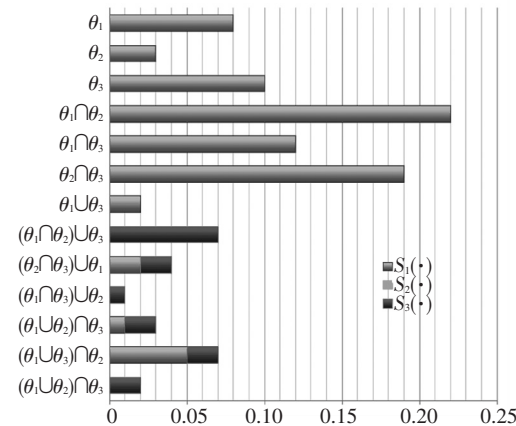


图 4 $S_1(A)$ 、 $S_2(A)$ 和 $S_3(A)$ 数值分布

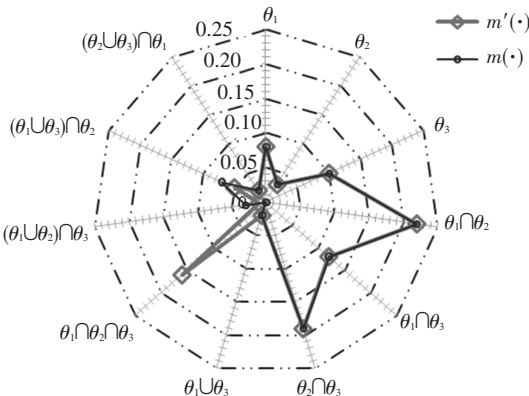


图 5 自由 DSm 模型与混合 DSm 模型计算结果

3 结 论

1)核动力装置中主冷却剂泵是一个复杂的非线性系统,其故障形式呈多态性和隐蔽性,针对主冷却剂泵故障特征微弱难以有效辨识及 DST 仅能解决在无高冲突辨识框架下的单一故障诊断等问题,本文提出并验证了主冷却剂泵并发故障 DSmT 融合算法.

2)结合并发故障的特点,构建了基于 DSmT 给出涵盖单发和并发故障的融合模型,对定义的

开放辨识框架约束了工程上核动力装置产生高度冲突存在的不合理现象,消除了与实际经验不符的并发故障情况,提高了决策速度.

3)对 DSmT 并发故障信息进行了实验分析,实验结果表明,提出的 DSmT 算法能够快速地给出主冷却剂泵的并发故障信息及预警,实现了主冷却剂泵的故障诊断和预测要求.虽然实验研究以主冷却剂泵并发故障诊断为例,但该方法具有推广价值,同样可应用到其他的工业设备或部件上.

4)对主冷却剂泵的 DSmT 并发故障诊断算法进行了初步实验,对于其他的大型工业设备,因其设备不同其故障机理也大行径庭,因而对于不同故障识别目标的辨识框架及 BPA 的合理取值均需进行进一步的研究.

参考文献

[1] 夏虹,陈志辉,邓礼平,等. 基于小波的突变信号识别方法及应用研究[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(12): 1451-1456.

[2] 夏虹,黄华,陈志辉,等. 基于频率补偿小波的屏蔽主泵裂纹转子识别[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(7): 841-847.

[3] DEZERT J, SMARANDACHE F. On the generation of hyper-power sets for the DSmT[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Information Fusion. Cairns, Australia: IEEE Xplore, 2003: 1119-1125.

[4] 侯俊,苗壮,潘泉. DST 与 DSmT 自适应融合算法[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(10): 150-152.

[5] 刘永阔,凌霜寒. DSmT 与 DST 融合门限改进方法[J]. 计算机应用, 2012, 32(4): 1037-1040.

[6] 于小红,周庆军,李艳丽,等. DST 与 DSmT 自适应融合算法研究[J]. 计算机与数字工程, 2013, 41(1): 35-37.

[7] 蒋海娜,文成林,徐晓滨,等. 证据相关下的并发故障诊断方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(S1): 94-97.

[8] AIROUCHE M, BENTABET L, ZELMAT M, et al. Pedestrian tracking using color, thermal and location cue measurements: a DSmT-based framework [J]. Machine Vision and Applications, 2012, 23(5): 999-1010.

[9] 陈法法,汤宝平,姚金宝. 基于 DSmT 与小波网络的齿轮箱早期故障融合诊断[J]. 振动与冲击, 2013, 32(9): 40-45.

[10] 翟旭升,胡金海,谢寿生,等. 基于 DSmT 的航空发动机早期振动故障融合诊断方法[J]. 航空动力学报, 2012, 27(2): 301-306.

[11] 李植良,徐晓滨,文成林. 基于扩展证据理论的并发故障诊断方法[J]. 杭州电子科技大学学报, 2008, 28(6): 107-110.